

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/001599

International filing date: 03 February 2005 (03.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2004-027302
Filing date: 03 February 2004 (03.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 21 April 2005 (21.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

21.02.2005

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2 0 0 4 年 2 月 3 日

出 願 番 号
Application Number: 特 願 2 0 0 4 - 0 2 7 3 0 2

パリ条約による外国への出願
に用いる優先権の主張の基礎
となる出願の国コードと出願
番号

The country code and number
of your priority application,
to be used for filing abroad
under the Paris Convention, is

J P 2 0 0 4 - 0 2 7 3 0 2

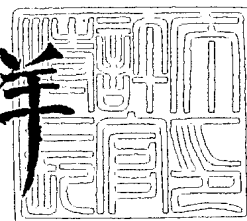
出 願 人
Applicant(s):

エヌティティエレクトロニクス株式会社
日本電信電話株式会社

2 0 0 5 年 4 月 7 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川 洋



【書類名】 特許願
【整理番号】 NEL03400
【提出日】 平成16年 2月 3日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01L 31/107
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都渋谷区道玄坂 1 丁目 1 2 番 1 号 エヌティティエレクトロ
 ニクス株式会社内
 【氏名】 石橋 忠夫
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都渋谷区道玄坂 1 丁目 1 2 番 1 号 エヌティティエレクトロ
 ニクス株式会社内
 【氏名】 安藤 精後
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 廣田 幸弘
【特許出願人】
 【識別番号】 591230295
 【氏名又は名称】 エヌティティエレクトロニクス株式会社
【特許出願人】
 【識別番号】 000004226
 【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社
【代理人】
 【識別番号】 100077481
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 谷 義一
【選任した代理人】
 【識別番号】 100088915
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 阿部 和夫
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 013424
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【包括委任状番号】 0111942

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

n 型電極層と、なだれ増倍層と、電界制御層と、バンドギャップ傾斜層と、層厚 W_A の光吸収層と、p 型電極層とが順次積層された積層体を備えているアバランシ・フォトダイオードであって、

前記光吸収層は、前記 p 型電極層側に設けられた層厚 W_{AN} の p 型層と前記バンドギャップ傾斜層側に設けられた層厚 W_{AD} の低濃度層との接合により構成されており、

前記 p 型層および前記低濃度層の各々のドーピングプロファイルは、素子動作状態において、前記 p 型層は前記低濃度層との接合界面近傍領域を除いて p 型中性状態を維持する一方、前記低濃度層は空乏化するように決定されているとともに、

前記 p 型層の層厚 W_{AN} と前記低濃度層の層厚 W_{AD} との比が、光吸収により前記光吸収層中に発生するキャリアの走行に伴う素子応答の遅延時間を τ_{total} 、前記 p 型層に起因する遅延時間を τ_{N2} 、前記低濃度層に起因する遅延時間を τ_{D1} 、前記光吸収層の全域を前記低濃度層とした場合の遅延時間を τ_D とした場合に、前記光吸収層の層厚 W_A ($= W_{AN} + W_{AD}$) が一定の条件において、次式を満足するように決定されていることを特徴とするアバランシ・フォトダイオード。

【数 1】

$$\tau_D > \tau_{total} = (W_{AD} \times \tau_{D1} + W_{AN} \times \tau_{N2}) / W_A$$

【請求項 2】

前記 p 型層の層厚 W_{AN} と前記低濃度層の層厚 W_{AD} との比は、 $[(W_{AD} \times \tau_{D1} + W_{AN} \times \tau_{N2}) / W_A]$ が極小値をとるように決定されていることを特徴とする請求項 1 に記載のアバランシ・フォトダイオード。

【請求項 3】

前記 p 型層および前記低濃度層は、InGaAsP 混晶半導体から成り、素子動作時における前記低濃度層の空乏化厚が $0.3 \mu m$ よりも厚い ($W_{AD} > 0.3 \mu m$) ことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載のアバランシ・フォトダイオード。

【書類名】 明細書

【発明の名称】 アバランシ・フォトダイオード

【技術分野】

【0001】

本発明は超高速アバランシ・フォトダイオードに関する。

【背景技術】

【0002】

アバランシ・フォトダイオード (APD) は、光吸収により発生したキャリア (電子とホール) を、なだれ機構により増倍させ、その出力電流を取り出すことによりノイズの低い光レシーバとして用いるデバイスである。最近の長波長帯域用アバランシ・フォトダイオードでは、光吸収層となだれ増倍層とを分離した構造である SAM (Separated Absorption and Multiplication) 構造とされるのが一般的であり、SAM 構造においては光吸収層となだれ増倍層の電界強度を独立に制御するために、それらの層の間に電界制御層とバンドギャップ傾斜層とが設けられる。

【0003】

アバランシ・フォトダイオードは、2.5 Gbit/s システム及び 10 Gbit/s システムに広く導入されるようになり、さらに次世代の 40 Gbit/s システム向けの素子としても開発がなされつつある。

【0004】

このような超高速アバランシ・フォトダイオードの技術分野においては、比較的低速動作の構造として従来典型的に用いられてきた構造であるところの InP をなだれ増倍層とする「ホール注入型」ではなく、高速動作の観点から有利となる「電子注入型」のアバランシ・フォトダイオードが注目されている。これまでに報告されている代表的な電子注入型のアバランシ・フォトダイオードは、光吸収層を空乏化 InGaAs とし、なだれ増倍層を InAlAs としたアバランシ・フォトダイオードである。

【0005】

図 4 は、このような電子注入型のアバランシ・フォトダイオードの動作状態におけるバンドダイアグラムである。この図において、41 は n 型電極層、42 はなだれ増倍層 (InAlAs)、43 は電界制御層、44 はバンドギャップ傾斜層、45 は低濃度光吸収層 (InGaAs)、46 は p 型電極層、47 は p 電極である。なお、光吸収層 45 は、その全域にわたって空乏化している。

【0006】

このような「電子注入型」のアバランシ・フォトダイオードの構造は高速動作に有利な反面、そのなだれ増倍層として用いられる InAlAs のバンドギャップが、「ホール注入型」のアバランシ・フォトダイオードのなだれ増倍層として用いられてきた InP のバンドギャップよりも大きいため、一定の電界強度が印加された状態でのイオン化率が相対的に低くならざるを得ず、素子の動作電圧が高くなってしまうという問題がある。

【0007】

このような構造のほかに、光吸収層を p 型中性層 (非空乏化領域) とこれに隣接する薄い低濃度層 (空乏化領域) とで構成し、非空乏化領域である p 型中性層を主たる光吸収層とした「電子注入型」のアバランシ・フォトダイオードの構造も報告されている (特許文献 1 参照)。

【0008】

図 5 は、このような電子注入型のアバランシ・フォトダイオードの動作状態におけるバンドダイアグラムである。この図において、51 は n 型電極層、52 はなだれ増倍層、53 は電界制御層、54 はバンドギャップ傾斜層、55 は低濃度光吸収層 (低濃度層)、56 は p 型光吸収層 (p 型中性層)、57 は p 型電極層、58 は p 電極である。ここで、非空乏化領域である p 型中性層は InGaAs 層である。

【0009】

この構造の電子注入型のアバランシ・フォトダイオードの光吸収層は、殆どが非空乏化

領域である p 型光吸収層 56 により占められている。すなわちこの構造は、「光吸収層を可能なかぎり p 型とした構造」である。この図に示した構造のアバランシ・フォトダイオードは、主として、暗電流の低減を目的とするものであるが、動作電圧の低減化にも有効な構造である。

【0010】

ところで、所望のアバランシ・フォトダイオードの性能を得るためには、光吸収層の厚さの決定が重要である。なだれ増倍が生じない状態 (pin フォトダイオード動作時) でキャリア発生率 (量子効率) が高くなければ、例えなだれ増倍を行ったとしても高い S/N 比を確保できないためであり、確保すべき周波数応答帯域の範囲において光吸収層の厚さ (W_A) を可能な限り厚く設計する理由はこのことによる。

【0011】

しかしながら、p 型中性層を主たる光吸収層とする図 5 に示した構造で 10 Gbit/s 以上の動作速度を実現しようとする、キャリア走行時間と量子効率とのトレードオフの関係により、光吸収効率 (量子効率) が低下してしまうという問題が生じる。これは、空乏化した InGaAs 層と p 型中性の InGaAs 層におけるキャリア速度は、前者の方が遙かに大きいことに起因している。すなわち、キャリア走行時間を一定値以下となるように設計すると、p 型中性の InGaAs 層 (p 型中性層) の厚さの上限は、空乏化した InGaAs 層を用いる場合の上限よりも薄くなることによるものである。

【0012】

以下に、確保すべき周波数応答帯域の範囲における光吸収層の厚さの半定量的な見積りについて説明する。

【0013】

アバランシ・フォトダイオードは、pin 型フォトダイオードに、比較的薄いなだれ増倍層を接続した構造として考えることができよう。その帯域は、pin フォトダイオードとして動作する状態の真性帯域 (真性 3 dB 帯域) から、なだれ増倍率が増加するにつれて、利得帯域積一定のラインに漸近するかたちで次第に低下する。しかるべき特性を得るには、利得帯域積とともに、pin フォトダイオード動作時の真性 3 dB 帯域を高く保つことが重要となる。pin 動作時の真性 3 dB 帯域は、光吸収層と増倍層中のキャリア走行時間で支配されるが、通常のアバランシ・フォトダイオードの構造では増倍層は光吸収層よりもはるかに薄いので、光吸収層中のキャリア走行時間が特性決定のための支配的なファクタとなる。

【0014】

増倍層構造は、光吸収層とはほぼ独立に設計できるものであり、増倍層のキャリア走行時間は共通に追加され则认为て良いので、ここでは、光吸収層のみで決まると仮定した際の帯域を考える。電子に比べホールの飽和速度 ($v_h = 5 \times 10^6$ cm/s) ははるかに小さいから、光吸収層がすべて空乏化した構造 (光吸収層厚 W_{AD}) におけるキャリア走行時間 τ_D は v_h で決まるものと近似すると、電荷制御モデルに従って、

【0015】

【数 1】

$$\tau_D = W_{AD} / 3v_h \quad (1)$$

【0016】

が得られる。また、3 dB 帯域 (f_{3dB}) は、

【0017】

【数 2】

$$f_{3dB,D} = 1 / [2\pi\tau_D] = [1 / W_{AD} (\mu m)] \times 24 \text{ GHz} \quad (2)$$

【0018】

で与えられる。例えば、10 Gbit/s 信号を受信する素子の 3 dB 帯域は、素子設計上の余裕を考慮すると、おおよそ $f_{3dB,D} = 20 \text{ GHz}$ が目安であるから、 W_{AD} は

、1.2 μm 程度にする必要がある。この W_{AD} の全領域にわたってホールの飽和速度を維持するためには、電界強度は50 kV/cm以上、すなわち電圧は最低で6 V以上が必要であり、なだれ増倍時の光吸収層電界強度は通常100 kV/cm程度に設計するから、光吸収層部分の電圧降下は12 Vとかなり大きくなる。

【0019】

一方、光吸収部分が、中性化光吸収層（濃度一定でその厚さが W_{AN} ）のみの場合には、キャリア走行時間 τ_N は電子の拡散時間で決まる。p型光吸収層で発生したホールは多数キャリアであるから、ホールの運動ではなくホール電流として、電荷中性を保つように応答する。従って、ホールの輸送特性が応答速度に直接関与することはない。電子の拡散係数を D_e とすると、キャリア走行時間（ τ_N ）は、

【0020】

【数3】

$$\tau_N = W_{AN}^2 / 3D_e \quad (3)$$

【0021】

となり、3 dB帯域（ f_{3dB} ）は、

【0022】

【数4】

$$f_{3dB,N} = 1 / [2\pi\tau_N] \quad (4)$$

【0023】

で近似される。光吸収層にドーピング濃度 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のInGaAsを用いるとすると、電子の移動度が6,000 cm^2/Vs 、拡散係数は150 cm^2/s 程度であるから、

【0024】

【数5】

$$f_{3dB,N} = [1/W_{AN}^2 (\mu\text{m}^2)] \times 7.2 \text{ GHz} \quad (5)$$

【0025】

となる。同様に、 $f_{3dB,N} = 20 \text{ GHz}$ を目安として考えると、必要な W_{AN} は0.6 μm 程度以下にする必要がある。中性化光吸収層を用いた場合には、キャリアを走行させるための電圧は必要ないので、素子の低電圧化には有利となるものの、光吸収層厚が空乏化光吸収層に比べ約半分の0.6 μm と薄いため、1.5 μm 帯の量子効率50%以下に留まり、感度の高いアバランシ・フォトダイオードを実現することが難しくなる。

【0026】

このように、アバランシ・フォトダイオードに望まれている動作電圧の低電圧化を中性化光吸収層を用いることで実現しようとする、10 Gbit/s以上で高速動作する素子の量子効率が低くなってしまいうという問題が生じる。

【0027】

【特許文献1】特許第3141847号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0028】

本発明はこのような問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、動作電圧の低電圧化と使用帯域での高量子効率化とを同時に実現可能な超高速アバランシ・フォトダイオードを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0029】

本発明は、このような目的を達成するために、請求項 1 に記載の発明は、n 型電極層と、なだれ増倍層と、電界制御層と、バンドギャップ傾斜層と、層厚 W_A の光吸収層と、p 型電極層とが順次積層された積層体を備えているアバランシ・フォトダイオードであって、前記光吸収層は、前記 p 型電極層側に設けられた層厚 W_{AN} の p 型層と前記バンドギャップ傾斜層側に設けられた層厚 W_{AD} の低濃度層との接合により構成されており、前記 p 型層および前記低濃度層の各々のドーピングプロファイルは、素子動作状態において、前記 p 型層は前記低濃度層との接合界面近傍領域を除いて p 型中性状態を維持する一方、前記低濃度層は空乏化するように決定されているとともに、前記 p 型層の層厚 W_{AN} と前記低濃度層の層厚 W_{AD} との比が、光吸収により前記光吸収層中に発生するキャリアの走行に伴う素子応答の遅延時間を τ_{total} 、前記 p 型層に起因する遅延時間を τ_{N2} 、前記低濃度層に起因する遅延時間を τ_{D1} 、前記光吸収層の全域を前記低濃度層とした場合の遅延時間を τ_D とした場合に、前記光吸収層の層厚 W_A ($=W_{AN} + W_{AD}$) が一定の条件において、次式を満足するように決定されていることを特徴とする。

【0030】

【数 6】

$$\tau_D > \tau_{total} = (W_{AD} \times \tau_{D1} + W_{AN} \times \tau_{N2}) / W_A$$

【0031】

請求項 2 に記載の発明は、請求項 1 に記載のアバランシ・フォトダイオードにおいて、前記 p 型層の層厚 W_{AN} と前記低濃度層の層厚 W_{AD} との比は、 $[(W_{AD} \times \tau_{D1} + W_{AN} \times \tau_{N2}) / W_A]$ が極小値をとるように決定されていることを特徴とする。

【0032】

請求項 3 に記載の発明は、請求項 1 または 2 に記載のアバランシ・フォトダイオードにおいて、前記 p 型層および前記低濃度層は、InGaAsP 混晶半導体から成り、素子動作時における前記低濃度層の空乏化厚が $0.3 \mu m$ よりも厚い ($W_{AD} > 0.3 \mu m$) ことを特徴とする。

【発明の効果】

【0033】

本発明によれば、従来のアバランシ・フォトダイオードに比べて動作電圧の大幅な低電圧化が可能となり、より信頼性の高い素子の実現と、光レシーバの低電力化を図ることができる。また、求められる帯域に対して量子効率が最大（すなわち受信感度が最良）となる素子設計を可能とする。

【0034】

このように本発明は、動作電圧の低電圧化と使用帯域での高量子効率化とを同時に実現可能な超高速アバランシ・フォトダイオードを提供するものであり、例えば、 $10 Gbit/s$ 領域を含む超高速光レシーバの安定化と高性能化に寄与するものである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0035】

以下に、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。

(第 1 の実施形態)

図 1 は、本発明のアバランシ・フォトダイオードの構成例を説明するための図であり、図 1 (a) は断面図、図 1 (b) は動作時におけるバンドダイアグラムである。これらの図において、11 は n 型 InP の n 型電極層、12 は InP のなだれ増倍層、13 は InP の電界制御層、14 は InGaAsP のバンドギャップ傾斜層、15 は低濃度 InGaAs の低濃度光吸収層、16 は p 型 InGaAs の p 型光吸収層、17 は p 型 InGaAsP の p 型電極層、18 および 19 は金属電極でありそれぞれ n 電極および p 電極である。なお、p 型光吸収層 16 および低濃度光吸収層 15 は、InGaAs に限らず InGaAsP 混晶半導体としてもよい。

【0036】

このアバランシ・フォトダイオードは、その動作状態において、p型光吸収層16はその一部を除いてp型中性（非空乏化光吸収層）を保ち、かつ、低濃度光吸収層15は空乏化（空乏化光吸収層）する様に、各々の光吸収層のドーピング濃度分布が決定されている。

【0037】

光吸収層に光信号が与えられると、p型光吸収層16と低濃度光吸収層15にそれぞれ電子/ホール対が発生する。p型光吸収層16中の電子は、p型電極層17で形成されたポテンシャルバリアに阻まれ、空乏化している低濃度光吸収層15へと拡散し、同時に、空乏化している低濃度光吸収層15中の電子とホールは、それぞれ電界により逆方向にドリフトして低濃度光吸収層15の両側へと流れる。これら2つの光吸収層領域で発生した電子は、InGaAsPのバンドギャップ傾斜層14およびInPの電界制御層13を介してなだれ増倍層12に達し、インパクトイオン化（なだれ増倍）を起こす。

【0038】

光吸収層内で電圧降下が生じるのは、空乏化している低濃度光吸収層15の部分のみであるから、同様のなだれ増倍層を用いるならば、光吸収層がすべて空乏化している従来のアバランシ・フォトダイオードに比べ動作に必要な電圧は低下する。例えば、十分な量子効率を確保するため、光吸収層厚を $1.2\mu\text{m}$ とした構造においては、従来の光吸収層全域にわたって空乏化させる典型的な構造では、光吸収層の電圧降下は 12V 程度になるが、本発明のアバランシ・フォトダイオードによれば、例えば、空乏化している低濃度光吸収層15の層厚を $W_{AD} = 0.7\mu\text{m}$ 、p型光吸収層16の層厚を $W_{AN} = 0.5\mu\text{m}$ とすると、なだれ増倍動作時の光吸収層電界を 100kV/cm と仮定して、そこでの電圧降下は 7V となり、必要なアバランシ・フォトダイオードの動作電圧は 5V 低減する。

【0039】

これに対して、図5に示した「光吸収層を可能なかぎりp型とした構造」は、動作電圧の低減には適しているものの、上述したように、一定以上の動作帯域（例えば 10Gb/s 動作）を確保する場合には効率が低下してしまうという制約を回避することができない。

【0040】

図2は、光吸収層の総厚を $1.2\mu\text{m}$ とした場合の本発明のアバランシ・フォトダイオードについての、キャリア走行に伴う素子応答の遅延時間（ τ_{total} ）と 3dB 帯域の、P型光吸収層の厚さ（ W_{AN2} ）依存性の計算例を説明するための図である。この図から、動作帯域に関しては、 $W_{AD} = 0.7\mu\text{m}$ 、 $W_{AN} = 0.5\mu\text{m}$ の条件で、従来形APDと同程度の性能が実現できることが読み取れる。

【0041】

結局、本発明によれば、従来のAPDと同一の量子効率と動作速度を保ちながら、動作電圧を 5V 低減させることができる。なお、動作速度に関しては、次の「第2の実施形態」で詳しく説明するように、「一定の光吸収層厚の条件において、空乏化光吸収層とp型光吸収層を組み合わせた構造」は、従来のアバランシ・フォトダイオードに比較してより高い帯域を実現可能なパラメータの範囲が常に存在する。

【0042】

ここで、特許文献1に記載されているアバランシ・フォトダイオードと本発明のアバランシ・フォトダイオードの相違点について説明すると以下のとおりである。すなわち、目的においては、特許文献1に記載されているアバランシ・フォトダイオードが「暗電流の経時劣化」を改善するのに対して、本発明は「低電圧化と高量子効率化の両立の実現」を目的としている。

【0043】

そして、それらの構成においては、特許文献1に記載されているアバランシ・フォトダイオードが、「空乏化する光吸収層の層厚を薄くする」ことにより、表面積の極小化の効果として「暗電流の経時劣化」が抑制され、安定な暗電流特性・高信頼性が実現できることとなるのに対して、本発明は「キャリアの全走行時間を極少値にするように空乏化領域

と非空乏化領域の厚みを決定」することにより「低電圧化と高量子効率化の両立の実現」を可能としている。

【0044】

このような構成上の差異の結果、特許文献1に記載されているアバランシ・フォトダイオードにおいては、空乏化領域と非空乏化領域の厚みは独立に定められるのに対して、本発明においては、空乏化領域と非空乏化領域の厚みは、これらの領域が構成する光吸収層の総厚みが一定という条件の下で、キャリアの全走行時間を極少値にするように空乏化領域と非空乏化領域の厚みが決定（最適化）される。

【0045】

なお、図5に示した構造のアバランシ・フォトダイオードと暗電流レベルを比較すると、本発明のアバランシ・フォトダイオードの空乏化光吸収層の方が厚いために、この空乏化光吸収層の厚さが暗電流の増加の原因となりうる。しかしこのような暗電流は、表面の電界強度を下げるためにガードリング構造を設けたアバランシ・フォトダイオードとして、回避することが可能である。

【0046】

（第2の実施形態）

本発明のアバランシ・フォトダイオードのpin-PD動作時における帯域において、空乏化光吸収層およびp型光吸収層の各層独立でのキャリア走行時間を求めると、基本的に式（1）および式（3）に従って、p型光吸収層のキャリア走行時間として $\tau_N = W_{AN}^2 / 3D_e$ が得られ、また、アバランシ層は層厚が薄いのでその部分の影響を無視すると、空乏化光吸収層のキャリア走行時間として $\tau_D = W_{AD} / 3v_h$ が得られる。

【0047】

電荷制御モデルの定義に従えば、それぞれの層の電荷変化量（空乏化光吸収層の ΔQ_D とp型光吸収層の ΔQ_N ）と電流変化（空乏化光吸収層の ΔI_D とp型光吸収層の ΔI_N ）とは、

【0048】

【数7】

$$\tau_D = \Delta Q_D / \Delta I_D, \quad \tau_N = \Delta Q_N / \Delta I_N \quad (6)$$

【0049】

の関係をもつ。ここで全光吸収層厚を $W_A = W_{AD} + W_{AN}$ とすると、各層同時にキャリアが発生する際、全キャリア走行時間 τ_{total} は、一般には、単純な和（ $\tau_D + \tau_N$ ）とはならない。なぜならば、一般の構造では、空乏化層“D1”と中性層“N2”とで発生したキャリアは互いの領域の電荷密度に影響を与えるために、互いの領域の電荷増分（ ΔQ_{N1} と ΔQ_{D2} ）の項が加わるからである。結局、空乏化層“D1”と中性層“N2”のキャリア発生による電荷量変化（ $\Delta Q_{D1} + \Delta Q_{N1}$ 、及び $\Delta Q_{N2} + \Delta Q_{D2}$ ）、と電流変化（ ΔI_D 及び ΔI_N ）との関係は、

【0050】

【数8】

$$\tau_{D1} = (\Delta Q_{D1} + \Delta Q_{N1}) / \Delta I_D, \quad \tau_{N2} = (\Delta Q_{N2} + \Delta Q_{D2}) / \Delta I_N \quad (7)$$

【0051】

で与えられる。ここで、 $\tau_{D1} \geq \tau_D$ および $\tau_{N2} \geq \tau_N$ である。

【0052】

しかしながら、電子とホール velocities が極端に異なるInP系半導体を用いた電子注入構造においては、光吸収層以外の層の走行時間を無視した場合、

【0053】

【数 9】

$$\tau_{\text{total}} = (W_{\text{AD}} \times \tau_{\text{D1}} + W_{\text{AN}} \times \tau_{\text{N2}}) / W \quad (8)$$

【0054】

で近似され、 τ_{D1} と τ_{N1} のそれぞれが、層厚で比例配分された和の形となる。

【0055】

式(8)のように単純化できる理由は以下のとおりである。電子速度がホール速度よりも十分に大きいと、p型光吸収層から空乏化光吸収層に注入された電子電荷は、空乏層の電荷状態(ほとんどホールで決まる)をわずかしき変化させない。一方、空乏化光吸収層で発生したホールがp型光吸収層に流れ込む際には、そこが中性であるがゆえに電荷を誘起しない。従って、 $\Delta Q_{\text{N1}} = \Delta Q_{\text{D2}} = 0$ の条件が成立し、全電荷量の変化は、 $\Delta Q_{\text{D1}} + \Delta Q_{\text{N2}}$ と近似される。全電荷に対する走行時間は、電流変化分について和($= \Delta I_{\text{D}} + \Delta I_{\text{N}}$)を取り、

【0056】

【数10】

$$\tau_{\text{total}} = (\Delta Q_{\text{D1}} + \Delta Q_{\text{N2}}) / (\Delta I_{\text{D}} + \Delta I_{\text{N}}), \quad (9)$$

【0057】

が得られ、さらに、 ΔI_{D} と ΔI_{N} は対応する層厚 W_{AD} および W_{AN} に比例するので、式(8)および式(9)から、

【0058】

【数11】

$$\begin{aligned} \tau_{\text{total}} &\div (\Delta I_{\text{D}} \times \tau_{\text{D1}} + \Delta I_{\text{N}} \times \tau_{\text{N2}}) / (\Delta I_{\text{D}} + \Delta I_{\text{N}}) \\ &\div (W_{\text{AD1}} \times \tau_{\text{D}} + W_{\text{AN2}} \times \tau_{\text{N}}) / (W_{\text{AD}} + W_{\text{AN}}) \\ &= (W_{\text{AD}}^2 / 3v_{\text{h}} + W_{\text{AN}}^3 / 3D_{\text{e}}) / W_{\text{A}} \\ &= [(W - W_{\text{AN}})^2 / 3v_{\text{h}} + W_{\text{AN}}^3 / 3D_{\text{e}}] / W_{\text{A}} \end{aligned} \quad (10)$$

【0059】

となる。

帯域は $f_{3\text{dB}} = 1 / [2\pi\tau_{\text{total}}]$ で近似されるので、式(10)の τ_{total} が最小になる様に W_{AD} と W_{AN} を定めることにより本発明のアバランシ・フォトダイオードの帯域を最適化できる。

【0060】

W_{A} を一定とした場合には、式(10)は、

【0061】

【数12】

$$W_{\text{AN}} = \left[-2D_{\text{e}} / 3v_{\text{h}} + \left[(2D_{\text{e}} / 3v_{\text{h}})^2 + 8WD_{\text{e}} / 3v_{\text{h}} \right] n^{0.5} \right] / 2 \quad (11)$$

【0062】

で極少値を取り、それから外れると τ_{total} は増大し、 $f_{3\text{dB}}$ は低下する。

【0063】

ここで重要なことは、一定の全光吸収層幅 $W_{\text{A}} = W_{\text{AD}} + W_{\text{AN}}$ の条件において、空乏化光吸収層とp型光吸収層を組み合わせた構造とすることにより帯域が増大することである。また、 τ_{total} の極少点は、明らかに W に対して単調増加関数であるから、一定の τ_{total} ないし $f_{3\text{dB}}$ に対して、 τ_{total} の極少点を与える W_{AD} と W_{AN} の組み合わせは、 W_{A} の最大値、すなわち量子効率最大の点を与えることが理解される。

【0064】

(第3の実施形態)

以下では、本発明のアバランシ・フォトダイオードの具体的な構造について、帯域 f_{3dB} が最大となる W_{AD1} と W_{AN2} の組み合わせについて説明する。ここでは、構造例として、40 Gbit/s アバランシ・フォトダイオードを念頭において考える。

【0065】

図3(a)は、 $W_A = W_{AD} + W_{AN} = 0.8 \mu\text{m}$ 、 $D_e = 150 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $v_h = 5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ として τ_{total} と f_{3dB} を計算した例を説明するための図である。p形光吸収層厚を $W_{AN} = 0.31 \mu\text{m}$ 、空乏化光吸収層厚を $W_{AD} = 0.49 \mu\text{m}$ とする、 τ_{total} が最小値2.8 ps、 f_{3dB} が最大値55 GHzとなることが分かる。すなわち、p形光吸収層のみの構造における f_{3dB} (11 GHz)もしくは空乏化光吸収層のみの構造における f_{3dB} (30 GHz)に比べ、飛躍的な帯域の増大が見込まれる。

【0066】

アバランシ・フォトダイオードの動作は、利得帯域積により制限を受け、おおよそ200 GHz程度が限界と考えられている。意味のあるなだれ増倍利得M(例えば $M = 2.5$)を得ることができる帯域は最大で約80 GHzである。

【0067】

図3(b)は、全光吸収層厚を $0.6 \mu\text{m}$ と一定とし、最適化された際に $f_{3dB} = 80 \text{ GHz}$ となる構造とした場合の τ_{total} と f_{3dB} を計算した例を説明するための図である。この図から、最大の f_{3dB} を与えるp型光吸収層厚と空乏化光吸収層厚として、 $W_{AN} = 0.26 \mu\text{m}$ 、 $W_{AD} = 0.34 \mu\text{m}$ が得られる。結局、本発明における光吸収層の設計手法がアバランシ・フォトダイオードの動作で実用的に意味がある空乏化光吸収層の厚さは、 $W_{AD} > 0.3 \mu\text{m}$ の範囲にあり、図3(b)で扱ったものよりも動作速度が低い素子では、最適な空乏化光吸収層の厚さは増加する方向にある。

【0068】

なお、上述した第2の実施形態および第3の実施形態では、説明の複雑化を避けるために、電荷制御モデルに基づく説明を行ったが、本発明を実施するためには電荷制御モデル以外の手法を適用することが可能なことはいうまでもない。例えば、素子中のキャリアの速度電界特性を用いて連続の式をベースにした手法や、モンテカルロ計算による手法を用いることにより、本発明の基本となるアバランシ・フォトダイオードの構成法に関する指針に何ら変更を加えることなく、より精度の高い構造最適化が可能である。

【0069】

また、これまでの実施形態の説明においては、p型光吸収層中の電子輸送を拡散メカニズムに基づいて取り扱ったが、バンドに傾斜をつけて擬電界を与えた構造もキャリア走行時間の短縮化には有効である。この構造を採用する場合の最適な W_{AN} と W_{AD} の比率は、p型光吸収層中の電子輸送が拡散のみの場合とは異なってくるものの、本発明の基本思想である「キャリアの全走行時間を極少値にする」という思想に基づいて素子設計することができる。

【産業上の利用可能性】

【0070】

本発明は、動作電圧の低電圧化と使用帯域での高量子効率化とを同時に実現可能な超高速アバランシ・フォトダイオードの提供を可能とする。

【図面の簡単な説明】

【0071】

【図1】本発明のアバランシ・フォトダイオードの構造を説明するための図で、(a)は断面構造の模式図、(b)は動作時におけるバンドダイアグラムである。

【図2】キャリア走行に伴う素子応答の遅延時間(τ_{total})と3 dB帯域の、中性化光吸収層の厚さ W_{AN} 依存性の計算例について説明するための図である。

【図3】本発明のアバランシ・フォトダイオードの、pin-PD動作時のキャリア走行時間と3 dB帯域の変化を説明するための図で、(a)は、 $W_A = W_{AD} + W_{AN} = 0.8 \mu\text{m}$ 、 $D_e = 150 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $v_h = 5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ として τ_{total}

1 と f_{3dB} を計算した例を説明するための図、(b) は、最適化された際に $f_{3dB} = 80 \text{ GHz}$ となる構造とした場合の τ_{total} と f_{3dB} を計算した例を説明するための図である。

【図 4】従来の典型的な電子注入型アバランシ・フォトダイオードの、動作時におけるバンドダイアグラムである。

【図 5】特許文献 1 に開示されている電子注入型アバランシ・フォトダイオードの、動作時におけるバンドダイアグラムである。

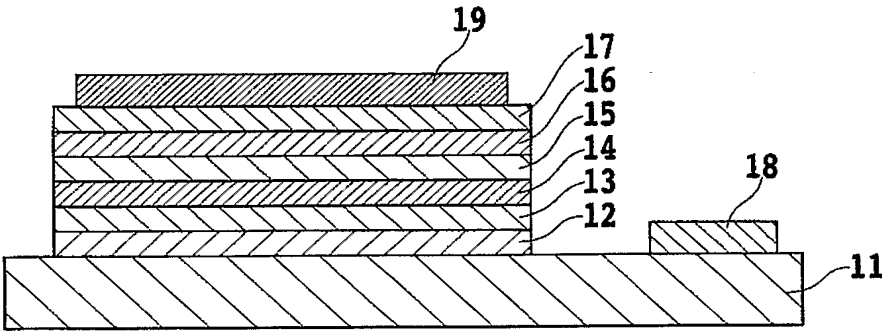
【符号の説明】

【0072】

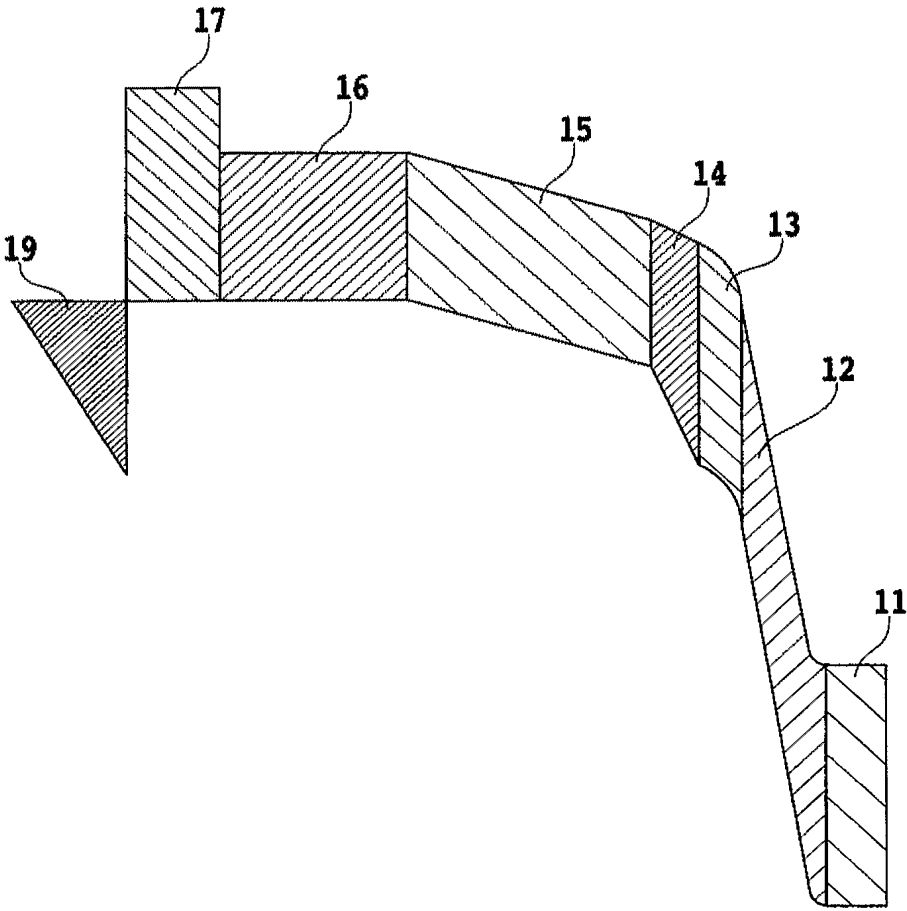
- 11、41、51 n 型電極層
- 12、42、52 なだれ増倍層
- 13、43、53 電界制御層
- 14、44、54 バンドギャップ傾斜層
- 15、45、55 低濃度光吸収層
- 16、56 p 型光吸収層
- 17、46、57 p 型電極層
- 18 n 電極
- 19、47、58 p 電極

【書類名】 図面
【図 1】

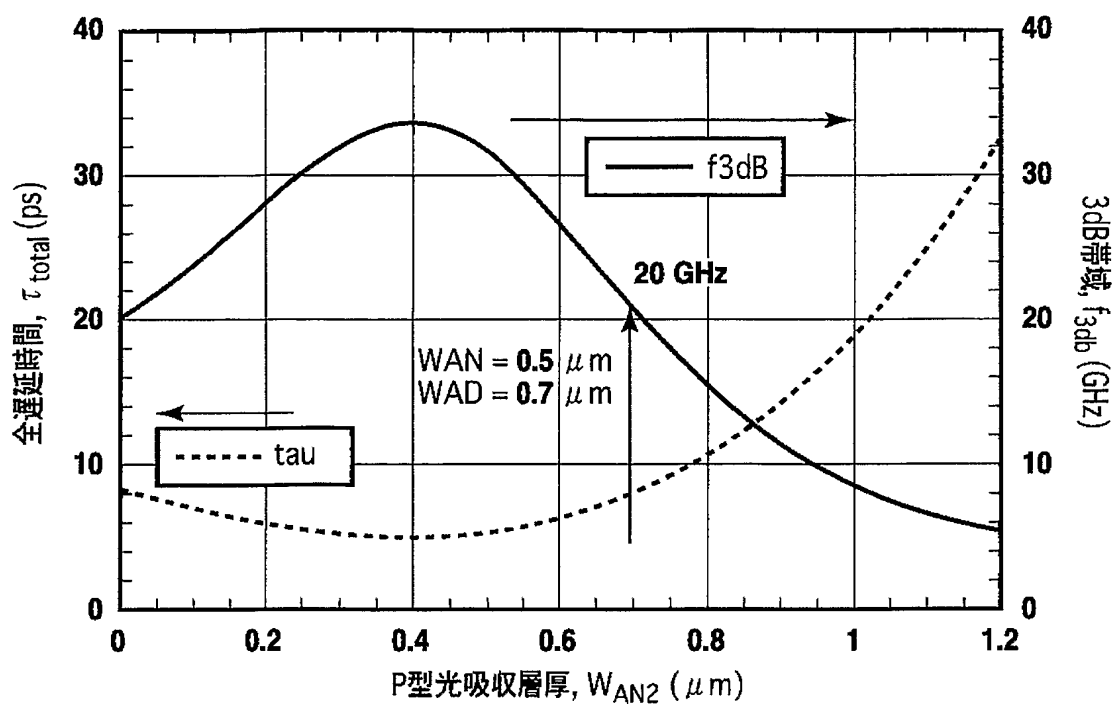
(a)



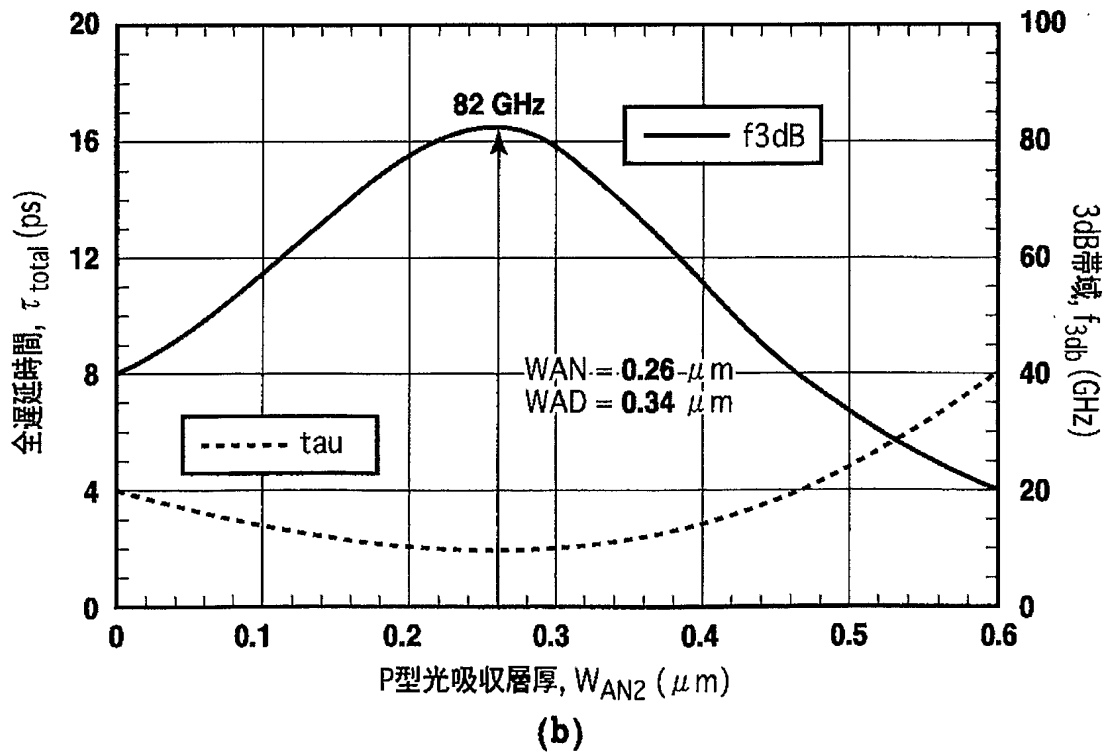
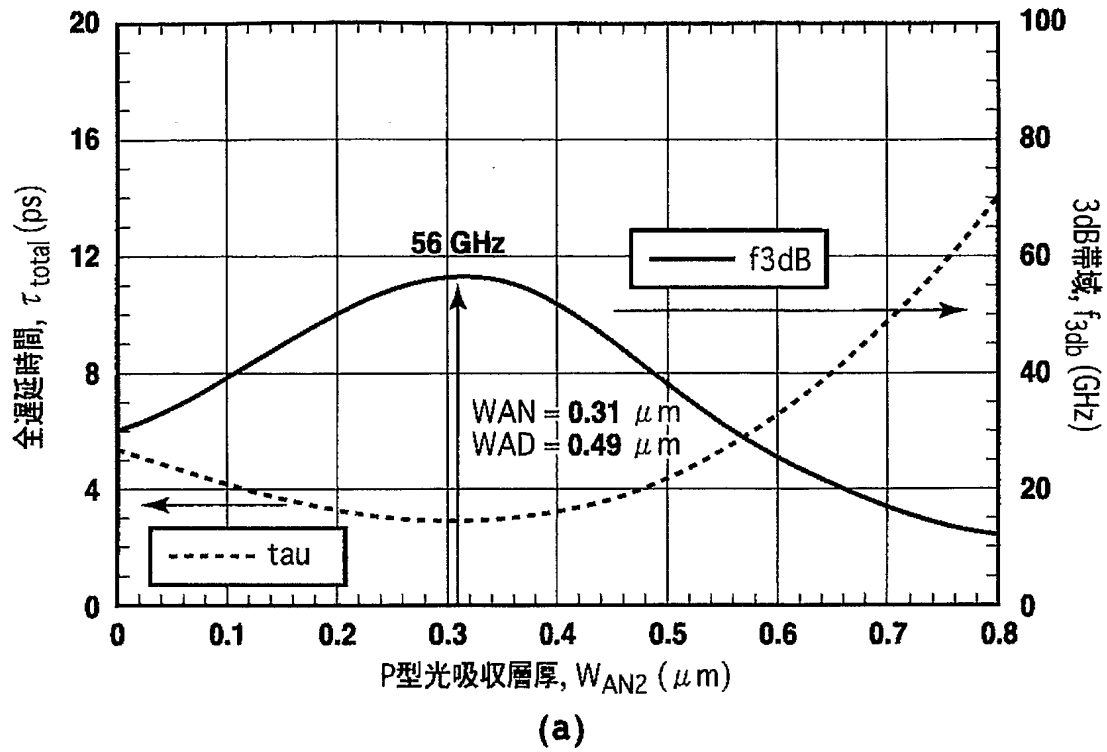
(b)



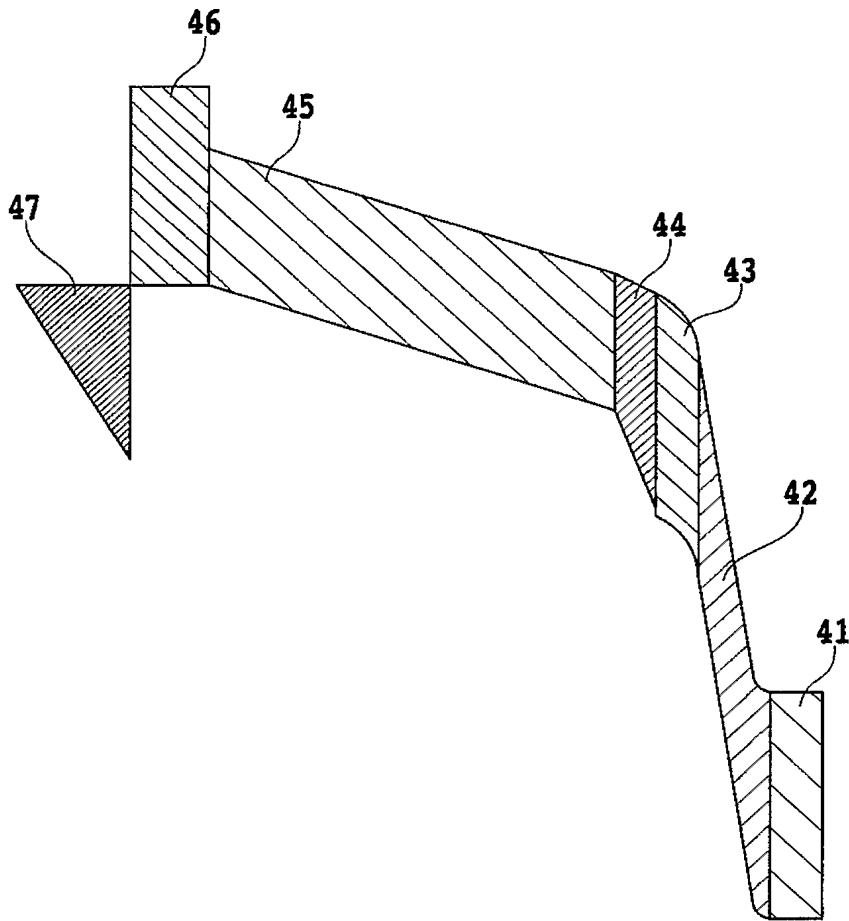
【図 2】



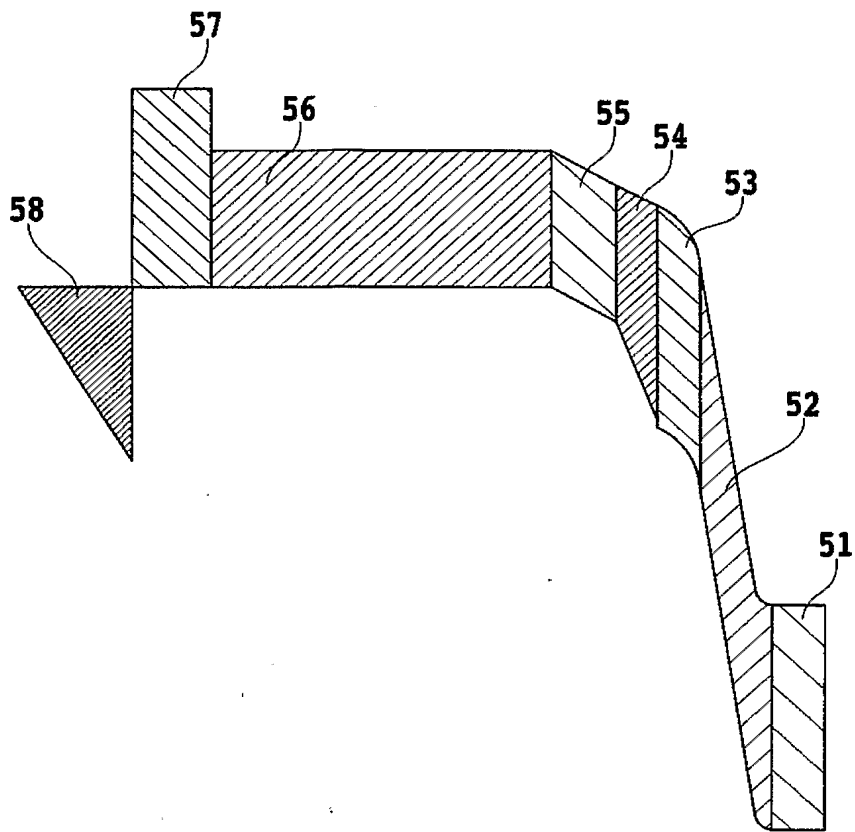
【図 3】



【図 4】



【図 5】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 動作電圧の低電圧化と使用帯域での高量子効率化とを同時に実現可能な超高速アバランシ・フォトダイオードを提供すること。

【解決手段】 アバランシ・フォトダイオードの動作状態において、p型光吸収層16はその一部を除いてp型中性（非空乏化光吸収層）を保ち、かつ、低濃度光吸収層15は空乏化（空乏化光吸収層）する様に、各々の光吸収層のドーピング濃度分布が決定されている。また、p型光吸収層16の層厚 W_{AN} と低濃度光吸収層15の層厚 W_{AD} との比は、光吸収層の層厚 W_A （ $=W_{AN}+W_{AD}$ ）が一定の条件において、 $W_{AD} > 0.3 \mu m$ の範囲であって、かつ、光吸収により光吸収層中に発生するキャリアの走行に伴う素子応答の遅延時間を極少値にするように決定されている。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 4 - 0 2 7 3 0 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[5 9 1 2 3 0 2 9 5]

1. 変更年月日

2 0 0 0 年 3 月 1 6 日

[変更理由]

住所変更

住 所

東京都渋谷区道玄坂1丁目12番1号

氏 名

エヌティティエレクトロニクス株式会社

特願 2 0 0 4 - 0 2 7 3 0 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 4 2 2 6]

1. 変更年月日	1 9 9 9 年 7 月 1 5 日
[変更理由]	住所変更
住 所	東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号
氏 名	日本電信電話株式会社